

(19)日本国特許庁 (JP)

(12) 特許公報 (B2)

(11)特許番号

特許第3216137号
(P3216137)

(45)発行日 平成13年10月9日 (2001.10.9)

(24)登録日 平成13年8月3日 (2001.8.3)

(51) Int.Cl.¹

H 03 H 9/25
9/145

識別記号

F I

H 03 H 9/25
9/145

D
D

請求項の数13(全 14 頁)

(21)出願番号 特願平8-511588
(86) (22)出願日 平成7年2月28日 (1995.2.28)
(86)国際出願番号 PCT/JP95/00312
(87)国際公開番号 WO96/10293
(87)国際公開日 平成8年4月4日 (1996.4.4)
審査請求日 平成10年12月25日 (1998.12.25)
(31)優先権主張番号 特願平6-235210
(32)優先日 平成6年9月29日 (1994.9.29)
(33)優先権主張国 日本 (JP)
(31)優先権主張番号 特願平6-256871
(32)優先日 平成6年10月21日 (1994.10.21)
(33)優先権主張国 日本 (JP)
(31)優先権主張番号 特願平6-277503
(32)優先日 平成6年11月11日 (1994.11.11)
(33)優先権主張国 日本 (JP)

(73)特許権者 99999999
セイコーエプソン株式会社
東京都新宿区西新宿2丁目4番1号
(72)発明者 高木 道明
長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイ
コーエプソン株式会社内
(72)発明者 桃崎 英司
長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイ
コーエプソン株式会社内
(72)発明者 生坂 芳則
長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイ
コーエプソン株式会社内
(74)代理人 99999999
弁理士 鈴木 喜三郎 (外1名)
審査官 清水 稔

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 SAWデバイス

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】平板状の圧電体と、
この圧電体の表面の第1の方向に周期 λ で並列に形成された膜厚Hの導体からなるM対の交差指電極を備えた交差指電極と、
この交差指電極の前記第1の方向の両端に配置され、前記交差指電極と並列した複数の反射電極を備えた1対の反射器とを有し、
前記圧電体は α 水晶単結晶の機械軸Yに垂直な面を電気軸Xの回りの反時計方向に角度 θ が32度ないし37度の範囲で回転させた平板であり、前記第1の方向と前記X軸のなす角度 ϕ の絶対値が40度ないし44度の範囲であり、前記第1の方向と交差する第2の方向に、前記交差指電極および反射電極の少なくとも一部が配置されており、前記第1の方向と前記第2の方向とのなす角度は、パワ

2
1
一フロー角にほぼ等しく設定され、

前記交差指電極一本当たりの弾性表面波の反射係数をa、前記交差指電極の対数をM、前記交差指電極の膜厚をH、前記交差指電極の周期を λ とすると、 $\Gamma = 4 \times M \times a \times H / \lambda$ で表される前記交差指電極のトータル反射係数 Γ が0.8ないし10の範囲であり、

前記交差指電極はアルミニウム金属膜で形成されており、前記交差指電極の前記膜厚および前記周期の比 H/λ がほぼ0.02ないし0.04の範囲であるSAWデバイスであつて、

前記パワーフロー角が 1.85 ± 1 度であり、さらに、前記第1の方向と前記第2の方向とのなす角度が、前記パワーフロー角の ± 1 度程度以内であることを特徴とするSAWデバイス。

【請求項2】請求項1において、前記反射電極の本数Nr

(2)

3

と前記交差指電極の対数Mとの比Nr/Mがほぼ1.5～2の範囲であることを特徴とするSAWデバイス。

【請求項3】請求項2において、前記交差指電極の対数Mが、ほぼ120ないし300の範囲であることを特徴とするSAWデバイス。

【請求項4】請求項3において、前記角度θが33±1度であり、前記角度φの絶対値が42.7度±1度であることを特徴とするSAWデバイス。

【請求項5】平板状の圧電体と、

この圧電体の表面の第1の方向に周期λで並列に形成された膜厚Hの導体からなるM対の交差指電極を備えた交差指電極と、

この交差指電極の前記第1の方向の両端に配置され、前記交差指電極と並列した複数の反射電極を備えた1対の反射器とを有し、

前記圧電体はα水晶単結晶の機械軸Yに垂直な面を電気軸Xの回りの反時計方向に角度θがほぼ4度ないし7度の範囲で回転させた平板であり、

前記第1の方向と前記X軸のなす角度φの絶対値が公差±30分の範囲で前記角度θと、

$$\theta = 2.775 \times (\phi - 32.5) + 6.5 \text{ (度)}$$

の関係があることを特徴とするSAWデバイス。

【請求項6】請求項5において、前記第1の方向と交差する第2の方向に、前記交差指電極および反射電極の少なくとも一部が配置されていることを特徴とするSAWデバイス。

【請求項7】請求項6において、前記第1の方向と前記第2の方向とのなす角度は、パワーフロー角にほぼ等しいことを特徴とするSAWデバイス。

【請求項8】請求項7において、前記角度θが6.5±1度であり、前記角度φの絶対値が32.5±1度であり、前記パワーフロー角が3.1±1度であり、さらに、前記第1の方向と前記第2の方向とのなす角度が、前記パワーフロー角の±1度程度以内であることを特徴とするSAWデバイス。

【請求項9】請求項7において、前記角度θが5.4±1度であり、前記角度φの絶対値が32.1±1度であり、前記パワーフロー角が3.2±1度であり、さらに、前記第1の方向と前記第2の方向とのなす角度が、前記パワーフロー角の±1度程度以内であることを特徴とするSAWデバイス。

【請求項10】請求項5において、前記交差指電極一本当たりの弾性表面波の反射係数をaとすると、 $\Gamma = 4 \times M \times a \times H / \lambda$ で表される前記交差指電極のトータル反射係数Γが0.8ないし10の範囲であり、

前記反射電極のピッチは前記交差指電極のピッチより広く、前記反射器の反射中心周波数と前記交差指電極の放射コンダクタンスの最大値を与える周波数とがほぼ一致し、さらに、

前記反射器の前記交差指電極の側の端は、前記交差指電

4

極と同じピッチで配置されていることを特徴とするSAWデバイス。

【請求項11】請求項10において、前記反射電極の本数Nrと前記交差指電極の対数Mとの比Nr/Mがほぼ1.5～2の範囲であることを特徴とするSAWデバイス。

【請求項12】請求項10において、前記交差指電極はアルミニウム金属膜で形成されており、前記交差指電極の前記膜厚および周期の比H/λがほぼ0.02ないし0.04の範囲であることを特徴とするSAWデバイス。

10 【請求項13】請求項10において、前記交差指電極の対数Mが、ほぼ71ないし300の範囲であることを特徴とするSAWデバイス。

【発明の詳細な説明】

技術分野

本発明は、弾性表面波（以下においてSAW（Surface Acoustic Wave）と呼ぶ）を用いたデバイスに関し、特に、高周波領域を安定して発振可能なSAW共振子に関するものである。

背景技術

20 水晶片などの圧電体平板の表面に交差指電極（以下においてIDT（Interdigital transducer）と呼ぶ）と、このIDTの両端に位置する反射器とを設けたSAW共振子の構造については、例えば、米国特許471616号公報、米国特許3886504号公報、あるいは特開昭61-281612号公報などに開示されている。

SAW共振子を構成する圧電体平板としては、水晶STカットを用いてそのX軸を弾性波の伝搬方向とした、いわゆるSTカットSAW共振子が知られている。このSTカットSAW共振子は零温度係数すなわち、周波数温度特性の1次係数αが0となるので周波数安定性に優れている。

従来、SAWデバイスは、高周波用のフィルターであるSAWフィルターとして用いられていたため、それほど高いQ値は要求されていなかった。しかしながら、近年、その用途として広がっている発振器を構成するSAW共振子においては、フィルターよりさらに安定した共振周波数を得ることが重要であり、良好な温度特性を有すると共にQ値の高い共振子を提供することが必要となっている。また、STカットSAW共振子は、1次温度係数αはほとんど0であるが、2次温度係数βは $-3.4 \times 10^{-8} / ^\circ\text{C}$ 2と比較的大きい。従って、SAW共振子の動作温度範囲である-20℃から80℃の温度範囲で約100ppmの周波数変化が発生することとなる。このため、移動体通信などの用途において、高周波数を精度良く発振するためには、さらに温度特性の安定したSAW共振子を提供する必要がある。

発明の開示

本発明においては、STカットSAW共振子などにおいて、その優れた周波数温度特性を劣化させることなくQ値の高いSAW共振子を提供することを目的としている。そのため、本発明のSAW共振子は、IDTおよびその両側

50

(3)

5

に位置した反射器を弾性表面波のエネルギーを閉じ込めるように構成している。さらに、IDTおよび反射器を圧電体上の弾性表面波の位相の進行方向と共にエネルギーの進行方向もカバーするように配置し、弾性表面波のエネルギーの閉じ込めをさらに効率良く行えるようにしている。

また、Q値の向上と共に周波数温度特性をさらに向上することも本発明の目的としている。そのために、1次係数 α が零となる範囲で2次係数 β を削減できる切断方位を見いだし、この切断方位を有する水晶片を用いて弾性表面波のエネルギーを効率良く閉じ込め、Q値が高く動作温度範囲内での周波数のずれの少ないSAW共振子を提供可能としている。

さらに、近年、大浦らによって米国FCS (Frequency Control Symposium, 1994年6月) および日本の電気学会電子回路研究会 (The Institute of Electrical Engineers of Japan, 1994年9月8日)において、STカットより周波数短期安定性能が1から2桁優れた水晶Kカットについての発表があった。この水晶Kカットとしては直交座標系におけるオイラー角表示で、 $(\phi, \mu, \nu) = (0., 96.51, 33.79)$ (度) 近傍の角度が提唱されている。しかし、このカット角は耐熱衝撃特性に優れていると言われているが、周波数温度特性が動作温度範囲内で使用できるか否か確認されていない。そこで、本発明においては、このカット角の近傍で、温度特性に優れたカット角を見いだし、Q値の高いSAW共振子を実現することを目的としている。

図面の簡単な説明

図1は、本発明のSAW共振子の方位を示す概念図である。

図2は、本発明の1ポート型のSAW共振子の構成を示す平面図である。

図3は、本発明の1ポート型のSAW共振子の異なる例の構成を示す平面図である。

図4は、トータル反射係数 Γ と共振振幅との関係を示すグラフである。

図5は、電極の膜厚 H および弾性表面波の波長 λ の比と、共振振幅との関係を示すグラフである。

図6は、IDTの放射コンダクタンスの中心周波数と、反射器の反射特性の中心周波数との関係を示す図である。

図7は、IDTの交差指電極の配置間隔、反射器の導体ストリップの配置間隔およびIDTと反射器の隙間を示す断面図である。

図8は、IDTと反射器の隙間と、共振振幅との関係を示すグラフである。

図9は、IDTおよび反射器の配置を角度 δ 傾斜させたときの角度 δ とQ値との関係の一実施例を示すグラフである。

図10は、角度 θ が-72.5度で角度 ϕ が25度および30度

(3)

6

のときの周波数温度特性を示すグラフである。

図11は、角度 θ が-72.5度で角度 ϕ が25度近傍の頂点温度 Θ_{max} と、2次係数 β の変化を示すグラフである。

図12は、パワーフロー角の補正をした方位決定の概念を示す図である。

図13は、角度 θ が約25度から50度の範囲で、1次係数 α が零を示す角度 θ と ϕ との組み合わせを示すグラフである。

図14は、図13に示す角度の組み合わせを用いた共振子の2次係数 β と、パワーフロー角PFAの変化を示すグラフである。

図15は、図13に示す角度の組み合わせの内、角度 θ が33度のときの周波数温度特性の角度 ϕ に対する変化を示すグラフである。

図16は、図13に示す角度の組み合わせの水晶片の音速降下特性を示すグラフである。

図17は、角度 θ が約2度から9度の範囲で、1次係数 α が零を示す角度 θ と ϕ との組み合わせ、および $\Delta F = 0$ の軌跡を示すグラフである。

図18は、図17に示す角度の組み合わせを用いた共振子の2次係数 β と、頂点温度 Θ_{max} の変化を示すグラフである。

図19は、2次係数 β と角度 θ の関係を示すグラフである。

図20は、図17に示す角度の組み合わせを用いた共振子の周波数温度特性の一例を示すグラフである。

図21は、図17に示す角度の組み合わせの水晶片の音速降下特性を示すグラフである。

図22は、電極の配置方向のPFAからのずれと、Q値との関係を示すグラフである。

図23は、PFAと角度 ϕ との関係を示すグラフである。

発明を実施するための最良の形態

以下において α 水晶単結晶(右水晶)からカットした水晶片を圧電体平板として採用したSAW共振子を例にとって本発明を詳しく説明する。左水晶の場合には、左手直交座標系に従い、以下の議論は同一である。図1に、本発明で用いる水晶片5の母材となるウェハ1の方位を示してある。ウェハ1は、水晶の機械軸であるY軸に垂直な、いわゆるY板2を水晶の電気軸Xの回りに反時計方向に角度 θ 度(ディグリー)回転させた面を備えており、この回転した面に対し水晶の機械軸Yおよび光軸Zの θ 度回転したY'軸およびZ'軸が規定される。さらに、SAW共振子を構成するIDT20および反射器30は、水晶の電気軸XをY'軸の回りに反時計方向を正として土 ϕ 度回転させたX'軸に沿って配置される。SAW共振子10を構成する水晶片5は、ウェハ1からZ'軸を土 ϕ 度回転させたZ"軸およびX'軸で規定される主面6を有するようにカットされる。

なお、角度 θ および ϕ をオイラー角表示で表すと $(0, \theta + 90^\circ, \phi)$ となる。また、角度の符号は反時計方向

(4)

7

を正 (+) とする。さらに、角度 ϕ の値については、+ 方向に回転した場合と - 方向に回転した場合とでは、その示す特性は同一である。すなわち、+ 方向と - 方向は対称であり、以下において示す角度 ϕ の値はいずれの方向であっても良い。

IDT および反射器の配置

図 2 および図 3 に、本発明にかかる交差指電極 (IDT) 20 および反射器 30 の配置を示してある。IDT20 は、向かい合った一対の電極 21a および 21b を備えており、それぞれの電極 21a および 21b から M 対の交差指電極 22a および 22b が櫛状に延びている。これらの交差指電極 22a および 22b は、前述の X' 軸と直交するようにピッチ Pt で並列に配置されている。この IDT20 の X' 軸に沿った両側には、隙間 g を開けて一対の反射器 30a および 30b が配置されている。それぞれの反射器 30a および 30b は、X' 軸と直交するようにピッチ Pr で並列に配置された複数の導体ストリップ 31 によって構成されている。電極 22 および導体ストリップ 31 は、水晶の平板 5 の上に Al、Au あるいは Cu 等の導体金属膜を蒸着あるいはスパッタ等の手段によって薄膜状に形成し、フォトリソグラフィ技術を用いてパターン形成することにより微細なパターンを有するものでも容易に製造することができる。

本発明の SAW 共振子 10においては、IDT20 および反射器 30a および 30b の配置にエネルギー閉じ込め型を採用し、さらに、IDT20 に直交する方向、すなわち弹性表面波の位相の進行方向である X' 軸 (角度 ϕ) に対しエネルギーの一伝搬する方向であるパワーフローの方向をカバーするように電極 22 および導体ストリップ 31 を配置してある。

エネルギー閉じ込め型の概念は、信学技報 (THE INSTITUTE OF ELECTRONICS, INFORMATION AND COMMUNICATION ENGINEERS TECHNICAL REPORT IEICE, JAPAN) US87-36 (pp9-16 (1987年9月発行)) の「エネルギー閉じ込め弹性表面波共振子」などに紹介されているが、本例の SAW 共振子 10においては、IDT20 のトータル反射係数 Γ を次の通り定義し、この値の範囲をほぼ 0.8~10 の範囲に設定している。

$$\Gamma = 4MaH/\lambda \quad \dots (1)$$

ただし、M は IDT の交差指電極 22 の対数、a は電極 22 の 1 本当たりの弹性表面波の反射係数、H は電極 22 を構成する導体の膜厚、さらに、 λ は弹性表面波の波長である。ST カット水晶板を圧電体の平板 5 として採用しアルミニウム (Al) で電極 22 を構成した場合において、a が 0.255、H/λ が 0.03 および M が 80 とすると 150~170MHz の共振周波数を持った 1 ポート SAW 共振子を構成でき、このとき Γ は 2.448 程度となる。

図 4 に、1 ポート SAW 共振子において、対数 M を変数にしてトータル反射係数 Γ を制御し、そのときの SAW 共振子の共振振幅の変化の様子を示してある。なお、反射器の導体ストリップの本数は 2M 本に設定してある。本図か

8

ら、 Γ が 0.8 程度から振幅が立ち上がる様子が見られ、共振子として使用可能であることが判る。一方、トータル反射係数 Γ を大きくするために電極膜厚に対する弹性表面波の波長の比 H/λ を大きくすると、電極膜に粘性ロスが存在するために共振振幅は最大値を持ち、その後徐々に減少する。本図では、 Γ が 10 程度から減少する様子が現れ、このとき M は約 160 である。従って、 Γ が 0.8 から 10 程度の範囲であれば、IDT の交差指電極によるエネルギー閉じ込め効果が得られるので特性の安定した共振子が得られる。

図 5 に、電極の対数 M および反射器の導体の数 Nr の総数を 150 に固定し、その範囲内で対数 M を変えたときの電極膜厚と、共振レベル (ピーク間のレベル App) の最大値との関係を測定した結果を示してある。本図で判るように、H/λ が 0.02 から 0.05 と大きくなるにつれて共振レベルの最大値は増加する。しかしながら、上述したように電極膜厚と周波数の比 H/λ が 0.06 に近づくと、表面波の音速が低下し粘性も現れるため共振レベルが低下する。従って、H/λ は 0.02 から 0.06 の範囲が望ましい。また、対数 M が増加すると上述したトータル反射係数 Γ が増加してしまうので、対数 M が 300 程度までをカバーするためには、H/λ は 0.02 から 0.04 程度であることがさらに望ましい。また、電極パターンの加工性を考慮してもこの範囲 H/λ を選択することが望ましい。

さらに、図 5において、対数 M と反射器の導体ストリップの本数 Nr との比 Nr/M が 1.5~2.0 とした場合に最良の共振振幅が得られることが判る。

本例の SAW 共振子では、IDT の放射コンダクタンスの中心周波数と、反射器の反射中心周波数をほぼ一致させることにより、IDT 自体におけるエネルギー閉じ込め効果に加え、反射器によるエネルギーを閉じ込める効果を向上している。この結果、SAW 共振子の共振先鋒度を高めることができ、Q 値の高い SAW 共振子を提供することができる。

図 6 に、IDT の放射コンダクタンスの特性と、反射器の反射特性の概略を示してある。実線で示したように、IDT の交差指電極のピッチ Pt と、反射器の導体のピッチ Pr とが同じときには、IDT の励振可能な弹性表面波の周波数のうち振幅がピーク値となる放射コンダクタンスの中心周波数が、反射器の反射中心周波数より若干低くなる。このため、本例では IDT のピッチ Pt と反射器のピッチ Pr の比 Pr/Pt を若干高く設定し、これらの中心周波数の値をほぼ一致させるようにしている。この結果、IDT における弹性表面波の励振が効率良く行われるようになり、共振子の振動変位の最大が IDT の中央に位置するようになるので、Q 値の高いエネルギー閉じ込め型の共振子を実現できる。本例の SAW 共振子では、図 5 に示したように、Pr/Pt が 1.004~1.008 程度に設定し、エネルギーの一閉じ込め効果の向上を図っている。

また、ピッチの異なる IDT と反射器との隙間 g は、縦

(5)

9

モードのスプリアス振動の発生を抑制するように、IDTのピッチPtの隙間Lbに合わせて設定してある。図7に、反射器30がIDT20に隣接して配置されている部分の断面を拡大して示してある。反射器30は、ピッチPrで導体ストリップ31が配置され、導体ストリップ31の幅Lcとストリップ同士の隙間Ldは高い反射率が得られるようにほぼ同じに設定してある。IDT20は、交差指電極22aおよび22bが交互にピッチPtで配置され、これらも電極の幅Laと電極同士の隙間Lbとはほぼ同じか、Laがやや大きくなるように設定してある。さらに、IDT20の反射器30側の電極と、反射器30のIDT20側の導体ストリップとの隙間gは、電極同士の隙間Lbと同じに設定して、反射器30のIDT20側の導体ストリップをピッチPrで並べてある。

図8に、隙間gを変えた場合の共振レベルへの影響を示してある。本図では、隙間gをIDTの最も反射器よりの電極からのピッチPgで表し、Pg/Ptの比を変えて共振レベルを測定している。本図から判るように、IDTと反射器との隙間のピッチは同一に保つことが好ましく、このピッチをずらすとスプリアス振動を誘発し、共振レベルが低下してしまう。

このように、IDT20および反射器30を圧電体である水晶片上に配置することによって、共振先鋒度を示すQ値の大きなSAW共振子を得ることができる。さらに、本例のSAW共振子10は、交差指電極22および反射器の導体ストリップ31をパワーフローの方向をカバーできるように配置してある。

図2に示したSAW共振子では、弾性表面波の位相の伝搬方向であるX'軸に対するエネルギーの伝搬方向であるパワーフロー角PFAは、異方性の圧電性結晶から切りだされるほとんどの圧電体平板においては零ではない。このことは、レーリー波に限らずリーキー波においても言えることである。SAWフィルターに関しては、パワー

(5)

10

* フローの方向と弾性表面波の位相の伝搬方向とを一致させる、すなわち、PFAを零とすることによって特性が改善されることが知られている。しかしながら、パワーフロー角PFAを零とする方向にカットした圧電体平板が温度特性や周波数安定性などの特性からみてSAW共振子として十分であるものが得られるとは限らない。このため、SAW共振子としてはパワーフロー角PFAと位相が伝搬する方向とを一致させることは現状では難しい。そこで、本例では、図2に示したように、弾性表面波の位相の伝搬方向に対し直交する方向に平行に延びた電極22および導体ストリップ31をZ'軸に対し平行移動させて、これらの配列した方向がX'軸から角度δだけ傾斜し、パワーフロー角PFAの方向に向かって配置されるようにしている。あるいは、図3に示すように、パワーフロー角PFAの方向もカバーできるように幅を広げてある。このように、パワーフローの方向を電極22および反射器の導体ストリップ31でカバーすることによって、IDTの励振エネルギーの閉じ込めをさらに効率良く行うことができるので、いっそう高いQ値を持ったSAW共振子を提供することが可能となる。

まず、本例の共振子のように、パワーフロー角PFAと弾性表面波の位相の伝搬方向とを一致させなくともパワーフローの方向に沿ったエネルギーの閉じ込め効果がえられることを説明する。弾性表面波のパワーフローベクトル P_i ($i=1, 2, 3$) の基本的特性として、特定の方向に前進して伝搬するベクトルを P_i とすれば、後退して伝搬するベクトルを $-P_i$ で表すことができる。これは次の通り証明される。

$$2P_i = k \omega A^2 C_{sj} C_{pk} C_{ijkl} \{ (1 - \eta_{pd1}) \times U/w + \xi_p \times V/w \} \quad \dots \dots (2)$$

ただし、

$$U = (\xi_s + \xi_p) \cos(\theta_{sj} - \theta_{pk}) - (\eta_p - \eta_s) \sin(\theta_{sj} - \theta_{pk})$$

$$V = (\xi_s + \xi_p) \sin(\theta_{sj} - \theta_{pk}) + (\eta_p - \eta_s) \cos(\theta_{sj} - \theta_{pk})$$

列の方向をX'軸に対し角度δ傾斜し、パワーフロー角PFAに沿って配置してある。また、IDT20の両側に位置する反射器30aおよび30bも、IDT20に対し角度δだけ傾斜して配置し、パワーフロー角PFAに沿って並べてある。

さらに、それぞれの反射器30aおよび30bを構成する導体ストリップ31も、弾性表面波の位相の伝搬方向であるX'軸に直交する方向に平行に並べ、これらストリップの配列の方向をX'軸に対し角度δ傾斜し、パワーフロー角PFAに沿って配置してある。このため、上記の式(2)に基づき示したように、パワーフロー角PFAに沿って伝搬する弾性表面波のエネルギーはIDT20、反射器30aおよび30bの間を両側に漏れることなくパワーフロー角PFAに沿って往復し、共振現象が生ずる。その結果、振動エネルギーの損失が極めて少なくなり、SAW共振子のQ値を大きくすることができます。本例のSAW共振子において、反射器30aおよび30bのPFA軸と直交する方向の

$$W = (\xi_s + \xi_p) 2 + (\eta_p - \eta_s) 2$$

$$U = (\xi_s + \xi_p) \cos(\theta_{sj} - \theta_{pk}) - (\eta_p - \eta_s) \sin(\theta_{sj} - \theta_{pk})$$

$$V = (\xi_s + \xi_p) \sin(\theta_{sj} - \theta_{pk}) + (\eta_p - \eta_s) \cos(\theta_{sj} - \theta_{pk})$$

$$W = (\xi_s + \xi_p) 2 + (\eta_p - \eta_s) 2$$

である。さらに、 l_i は伝播方向ベクトル、 d_i は減衰方向ベクトル、 $\xi_i + j \eta_i$ は減衰率 (j は虚数単位)、 C_{ij} および θ_{ij} は振幅定数、 ω は角周波数、 A は任意の振幅定数、 C_{ijkl} は弾性定数 ($i, j, k, l=1, 2, 3$ をとる)、さらに、 k は波数である。

上記の(2)式において、弾性表面波の伝搬方向が l_i から $-l_i$ すなわち、前進から後退にかわると、1972年電子通信学会信越支部大会 (Sinetu Section of IECE Japan) で発明者により開示されたように $\xi_i + j \eta_i$ が $\xi_i - j \eta_i$ に、また、 θ_{ij} は $-\theta_{ij}$ になることが証明されている。このため、弾性表面波の伝搬方向が反対方向に変わると、パワーフローベクトルは $-P_i$ となる。

図2に示したSAW共振子10において、IDT20の交差指電極22aおよび22bを、弾性表面波の位相の伝搬方向であるX'軸に直交する方向に平行に並べ、これらの電極の配

(6)

11

幅 W_r を、IDT20のPFA軸と直交する方向の幅 W_t と同じあるいは広くして反射器からのエネルギーの漏れを少なくすることが望ましい。

IDT20、反射器30aおよび30b、さらにこれらを構成する電極22および導体ストリップ31を図2に示したようにパワークローラーPFAに沿って配置することが最も望ましい。しかし、これらの配置を位相の伝搬方向に対し多少でも、すなわち零でない角度 δ だけパワークローラーPFAの方向に傾けることによって、X'軸方向にIDTや反射器を配置したSAW共振子と比較し振動エネルギーを効率良く閉じ込めることができる。従って、これらの配置を変えることによってSAW共振子のQ値の改善を図れる。

図3に、反射器30aおよび30bをIDT20に対し弾性表面波の位相の伝搬方向X'軸に沿って配置し、反射器30aおよび30bのX'軸に直交する幅 w_r を広げることによって、パワークローラーPFAに沿って伝搬するエネルギーを閉じ込められるタイプのSAW共振子の例を示してある。本例のSAW共振子10は、IDT20のX'軸に直交する方向の幅 W_t に対し、幅 w_r の広い反射器30aおよび30bをIDT20の両側に配置してある。反射器の幅 w_r は、パワークローラーPFAに沿ってパワークローラーPFAに直交する方向の幅 W_t が確保できるように選定されており、IDT20からパワークローラーPFAの方向に伝搬する弾性表面波のエネルギーのほとんどを反射器30aおよび30bによって反射し、上記のSAW共振子と同様にエネルギーの共振状態を生じさせることができるようにになっている。本例のSAW共振子は、従来と同様に位相の伝搬方向にIDTおよび反射器が配置され、これらを構成する電極22および導体ストリップ31は位相の伝搬方向に配列されているが、反射器の幅を広げることによってエネルギーの閉じ込め効果を向上させ、高いQ値を得ることができる。

図9に、位相の伝搬方向に対し幾つかの角度 δ 傾斜した方向に上述した図2あるいは図3のようにIDTおよび反射器を配置したSAW共振子において測定されたQ値を示してある。これらのSAW共振子は、圧電体として水晶STカットを用いた共振周波数が150MHzから170MHzの共振子である。本図にて判るように、角度 δ を大きくするとQ値は大幅に向上升し、パワークローラーの方向とほぼ等しい角度 δ が5度近傍において 2.5×10^4 と非常に高いQ値を持つSAW共振子が得られた。

さらに、図1の(θ , ϕ)の表示で(-72.5, 25)と、(-72.5, 30)のX'軸方向に位相の伝搬するSAW共振子を作成し、その温度特性を測定した。この測定によって得られたそれぞれの共振子の周波数温度特性を図10に示してある。また、角度 θ は同じに設定し、角度 ϕ を25度近傍でえたSAW共振子における周波数温度特性の変化を計算し、その結果を図11に示してある。この計算においては、エネルギーの伝搬方向の傾き、すなわち、パワークローラーPFAは考慮していない。図11には、各共振子の周波数温度特性カーブの頂点で温度 Θ_{max} と、20

(6)

12

℃における周波数2次温度係数 β 20の角度 ϕ に対する変化を示してある。

図10および図11を比較すると判るように、実測した角度 ϕ が25度のSTカットSAW共振子の周波数温度特性は、頂点の温度 Θ_{max} が100℃であり、計算結果によると角度 ϕ が20度のときに対応する。また、実測した角度 ϕ が30度の周波数温度特性は、頂点の温度 Θ_{max} が20℃であり、計算による角度 ϕ が25度のときに対応する。このように、周波数温度特性の実測結果に対して計算結果は、角度 ϕ の絶対値が約5度小さくなる方向にずれていると思われる。一方、計算によると水晶片のパワークローラーとX'軸とのなす角度は、絶対値で角度 ϕ よりも-4.75度小さくなる方向にずれていることが判っており、周波数温度特性のずれとほぼ一致することが判る。以上の結果から、周波数温度特性もパワークローラーPFAだけではなく実現されるようである。従って、面内の回転角 ϕ をパワークローラー角度分だけ補正して設定すれば、零温度係数を示す弾性表面波の伝搬方向とエネルギーの伝搬方向を一致させることができると考えられる。そして、主な動作温度領域で良好な周波数温度特性を備え、発振も非常に安定したSAW共振子を実現できると考えられる。

図12に、パワークローラーPFAを+方向にとった一般的なIDTの配置を示してある。まず、水晶片上の弾性表面波の伝搬方向をX"軸に設定する。このX"軸は、水晶の電気軸+X軸を角度 ϕ' 回転させた軸であり、角度 ϕ' は以下の式で表される。

$$\phi' = \phi - PFA \quad \dots \dots \quad (3)$$

そして、先に図2に基づき説明したIDTおよび反射器が配列された電極形成領域40を-PFAの方向に回転させ、零温度係数を示す方向にPFAの方向41を一致させれば良い。図中の42、43および44は、SAW共振子の振動振幅の変位を示している。

なお、このような考え方は、前述の温度特性に限らず、他の応力感度特性、短期安定性などにかかわる方位についても言えると推定される。

水晶圧電体の選定

このようにIDTおよび反射器を弾性表面波のエネルギーの伝搬方向をカバーするように配置することによって、共振先鋒度が高くQ値の大きなSAW共振子を得ることができる。移動体通信などに用いられる共振子としては、さらに、温度に対して非常に安定した特性が要求される。STカット水晶片を用いたSAW共振子は、周波数温度特性の1次温度係数 α が零になることから安定した発振源として着目されている。しかし、先に説明したように2次温度係数 β が比較的大きく、広い動作温度範囲、例えば-20℃から80℃の範囲で使用するにはさらに温度特性を改善することが望ましい。このような要望に対し、発明者は、前述のSAW共振子の構造方法において、新たに、先に図1に示した座標系を用いて角度 θ がほぼ25度から45度の範囲で、角度 ϕ がほぼ40度から47度の範

(7)

13

回を組み合わせることによって周波数温度特性のさらに優れたSAW共振子を提供できることを見いだした。

図13に、周波数温度得す営の1次係数 α が零($\alpha=0$)となる回転角 θ および ϕ の組み合わせの範囲を示してある。 α は、以下の式に示したように周波数温度特性カーブを常温の20°Cでテイラー展開して得られる温度Tに対する1次の係数を示している。

$$\Delta f/f = \alpha (T-20) + \beta (T-20)^2 + \gamma (T-20)^3 \quad \dots \quad (4)$$

ここで、 $\Delta f/f$ は20°CにおけるSAW共振子の周波数を基準とした、他の温度における周波数の変化率である。アルミニウム電極を用いたSAW共振子においては、周波数温度特性はアルミニウム電極の膜厚Hに依存する。このため、図13は、先に説明したように H/λ として望ましい0.02から0.04の範囲のSAW共振子を前提として表してある。

さらに、1次係数 α が零となるSAW共振子の面内の回転角 ϕ を変えて温度の2次係数 β を測定した。図14に、その測定結果と、パワーフロー角PFAを示してある。本図にて判るように、角度 ϕ がほぼ40度から47度の範囲において、2次係数 β が $-2.5 \times 10^{-8}/\text{C}^2$ 以下となる。これは、従来のSTカットSAW共振子の2次係数 β が $-3.4 \times 10^{-8}/\text{C}^2$ であるのに対し、その2/3以下と低い値であり、周波数温度特性を大幅に改善できることが判る。また、この角度 ϕ の範囲では、パワーフロー角PFAも0度に近く、先に説明したようにエネルギーの閉じ込めを効率良く行える。従って、角度 θ がほぼ25度から45度の範囲で、角度 ϕ がほぼ40度から47度の範囲の切断方位を持つた水晶片を用いることによって、良好な周波数温度特性と共に高いQ値を備えたSAW共振子を実現することが判る。

さらに、2次係数 β は、角度 ϕ が44度近傍にて最小値である約 $-1.4 \times 10^{-8}/\text{C}^2$ と、従来のSTカットSAW共振子の約半分以下と非常に低い値を示す。また、パワーフロー角PFAは角度 ϕ が40度に近いほど低い値を示す。従って、上記の角度範囲において、角度 ϕ がほぼ40度から44度で、これに対応した角度 θ がほぼ25度から37度の範囲の切断方位を持つた水晶片を用いることが望ましい。特に、角度 θ が 33 ± 1 度で、角度 ϕ が 42.75 ± 1 度の切断方位の水晶片においては、その表面に結晶配向性に優れたアルミニウム単結晶膜が得られるので、経時変化が非常に少ないSAW共振子を提供することができる。したがって、この角度範囲を含んだ角度 θ がほぼ32度から37度で角度 ϕ がほぼ40度から44度の範囲の切断方位を持つた水晶片を用いることがさらに望ましい。これらの角度 θ および ϕ の切断方位の水晶片を用いることにより、2次係数 β も $-1.6 \times 10^{-8}/\text{C}^2$ と従来のSTカットSAW共振子の半分程度になるので、周波数温度特性は非常に改善される。なお、上記の角度範囲において周波数温度特性の3次係数である γ は $-1 \times 10^{-10}/\text{C}^3$ 以下と非常に小

(8)

14

さい。

図15に、角度 θ を33度として、角度 ϕ を42度から45度範囲にわたって変化させた場合の1次温度係数 α 、2次温度係数 β および周波数温度特性カーブの頂点の温度 Θ_{max} の計算結果を示してある。計算結果によると、角度 θ が33度で角度 ϕ が42.75度のSAW共振子は Θ_{max} が室温20°C近傍となる。しかしながら、先に図2および図3で示した傾斜角 δ を設定していない従来のSAW共振子においては、共振の先鋭度を示すQ値が低い。これ

に対し、傾斜角 δ を設定し、その値 δ をパワーフロー角PFA(1.85度)とほぼ等しくすると、Q値は2倍以上に向上することが判った。このような顕著な効果を得るためにには、傾斜角 δ をパワーフロー角PFAの $\pm 1^\circ$ 程度とすることが好ましい。さらに、IDTおよび反射器をパワーフロー角PFAを考慮して傾斜させたこのSAW共振子の周波数温度特性は、-20°Cから80°Cの動作温度範囲において50ppm以下と低い値を示した。

この切断方位の水晶片を用いて、先に説明したようなエネルギー閉じ込め型のSAW共振子を実現するには、まず、電極一本当たりの弾性表面波の反射係数 a を求める必要がある。このため、膜厚Hのアルミニウム膜を水晶片の表面全部に形成したときのX'軸方向に伝搬する弾性表面波の位相速度を計算した。その結果を図16に、 H/λ に対する、 $H=0$ の場合の位相速度 V_0 と膜厚Hの時の位相速度 V_h の比 $D=V_h/V_0$ を用いて表してある。また、図16には、従来のSTカット水晶片を用いた計算結果161と、上述した切断方位のうち θ が33度で ϕ が42.75度の水晶片を用いた計算結果160を示してある。

弾性表面波の波長 λ は、IDTの交差指電極の周期 $2P_t$ (P_t は、上述したようにIDTの交差指電極のピッチを示す)とほぼ一致し、図16に示した位相速度の変化率であり、速度降下特性と通常呼ばれる特性と反射係数 a との間には以下の式がなりたつ。

$$a = K \{ (1/D)^2 - 1 \} / (4H/\lambda) \quad \dots \quad (5)$$

ただし、

$$K = 0.8271 \times \text{SIN}(\pi \eta)$$

$$\eta = La/P_t$$

である。 La は、図7に基づき説明したように交差指電極一本当たりの横幅であり、この電極幅 La と電極間の隙間 Lb が等しい場合は、 η が0.5となる。

(5)式は、弾性表面波の伝搬路をMason等価回路で表示した際の自由表面の音響インピーダンス Z_f と、膜形成時の音響インピーダンス Z_m の比が以下の通り各々の音速の2乗の比として表せること、

$$Z_m/Z_f = D^2 \quad \dots \quad (6)$$

および、音響インピーダンス不整合による反射係数 γ が、以下の式で表され、

$$\gamma = (Z_f - Z_m) / (2Z_m) \quad \dots \quad (7)$$

さらに、反射係数 a および γ が次の式で近似できることから導出される。

(8)

15

$$2aH/\lambda = b \gamma \times \sin(\pi \eta) \quad \dots \dots (8)$$

なお、STカット共振子の反射係数 a ($a = 0.255$) を導き出す段階で定数 b が決定されており、その値 ($b = 0.8271$) を採用している。

上記の (5) 式を用いて本例の水晶片に対する反射係数 a を求めるために、図16に示した速度比 D のうち、 H/λ として適当な値である $H/\lambda = 0.03$ に対応する値、 $D = 0.988$ を代入する。この結果、本例の水晶片の反射係数 a として 0.1684 が得られる。

さらに、エネルギー閉じ込め型のSAW共振子として、先に説明したSTカットSAW共振子と同じ程度のトータル反射係数 ($\Gamma = 2.448$) を得るために必要とされる交差指電極の対数 M を求める。このため、(1) 式に上記にて求めた反射係数 a を代入すると、必要な対数 M として 121.1 が得られる。すなわち、IDTを構成する交差指電極の対数 M として 120 対程度であれば、先にSTカット水晶SAW共振子において説明したような高い Q 値を持ったSAW共振子を得ることができる。さらに、本例の共振子は、周波数温度特性の変動の少ない圧電体を用いて構成してあるので、本発明により周波数特性の優れ、 Q 値の大きなSAW共振子を実現することができる。

SAW共振子は、発振回路において並列容量値 C_0 が通常 6 pF 以下で使用される。SAW共振子の容量値 C_0 は、以下の式で求められる。

$$C_0 = 1.95 \epsilon_0 \epsilon_\Gamma W_{cM} \quad \dots \dots (9)$$

ただし、 ϵ_0 は真空の誘電率であり、 ϵ_Γ は比誘電率 (水晶はほぼ $4.43 \sim 4.63$) である。また、 W_{cM} は、位相の伝搬する方向に直交する方向のIDTの幅寸法であり、横方向のスプリアス振動の励起を考慮すると W_{c}/λ をほぼ $3.5 \sim 40$ の範囲に収めることができるとされる。この結果、対数 M の最大値は 300 程度となることが判る。また、容量 C_0 および電極パターンの加工性を考慮すると、上述したように H/λ の範囲はほぼ 0.02 から 0.04 が望ましい。

さらに発明者は、周波数の短期安定性が非常に優れた切断方位として提唱されているKカット近傍の切断方位を有する水晶を用いたSAW共振子についても、その周波数温度特性を確認した。そして、 Q 値が高く、周波数の短期安定性にも優れたSAW共振子を実用に供する諸条件を見いだした。

図17に、図1に示した角度 θ および ϕ の組み合わせのうち、Kカットの近傍、すなわち、角度 θ が 2 ないし 9 の範囲において周波数温度特性の 1 次係数 α が 0 となる組み合わせを示してある。また、図17には、SAW共振子にレーザーを照射した際の瞬時の周波数シフト量 ΔF が零を示す角度 θ および ϕ の組み合わせも示してある。本図にて判るように 1 次係数 α が零 ($\alpha = 0$) となる組み合わせを示す曲線と、周波数シフト量 ΔF が零 ($\Delta F = 0$) となる組み合わせを示す曲線は、角度 θ が 5.4 度および角度 ϕ が 32.1 度である点 P において交差する。従って、この角度を切断方位とした水晶片は零温度係数で

(8)

16

周波数シフト量が零となることが判る。この点 P の近傍、すなわち、角度 θ が 4 度から 7 度および角度 ϕ が 31 度から 33 度の範囲において、1 次係数 α が零となる角度 θ および ϕ の組み合わせを実験的に求めた。それらの組み合わせは次の式で近似できる。

$$\theta = 2.775 \times (\phi - 32.5) + 6.5 \quad \dots \dots (10)$$

図18に、(10) 式の成り立つ角度 θ および ϕ のうち、角度 θ を 6.5 とし、角度 ϕ を 32.5 度近傍に設定した水晶片において、その周波数温度特性カーブの頂点を示す温度 Θ_{\max} と、周波数温度特性の 2 次係数 β の変化を示してある。本図から、周波数温度特性カーブの頂点を示す温度 Θ_{\max} の動作温度範囲のうち通常の使用条件である $20 \pm 20^\circ\text{C}$ に入るようになるには、角度 ϕ の許容値を ± 30 分に設定すれば良いことが判る。また、周波数温度特性の 2 次係数 β は、本図に示したように $-2.4 \times 10^{-8}/\text{C}^2$ から $-2.7 \times 10^{-8}/\text{C}^2$ の範囲であり、従来のSTカットの 2 次係数 β ($-3.4 \times 10^{-8}/\text{C}^2$) の $2/3$ 程度の低い値を示す。特に、方位 (θ, ϕ) が $(6.5, 32.5)$ および $(5.4, 32.1)$ の場合は、2 次係数 β は $-2.5 \times 10^{-8}/\text{C}^2$ である。

また、図19に、(10) 式で示した角度 θ および ϕ の関係を持った水晶片の 2 次係数 β の変化を示してある。本図で判るように、角度 θ がほぼ 4 度から 7 度の範囲で、周波数温度特性の 2 次係数 β は、おおむね $-2.5 \times 10^{-8}/\text{C}^2$ 以下の良好な値をとる。従って、角度 θ および ϕ が (10) 式の関係を持ち、角度 θ がほぼ 4 度ないし 7 度の範囲であれば、温度特性が改善され、さらに短期安定性の非常に高いSAW共振子を構成できることが判る。この範囲内であれば、2 次係数 β の変動は非常に少なく安定しているので、角度 θ の許容値としては土度程度で良い。

図20に、本例の切断方位の水晶片を用いて制作されたSAW共振子の周波数温度特性の実測値の一例を示してある。本図にて判るように、動作温度範囲である -20°C から 80°C にわたって、周波数変化率は 68ppm と少ない値を示し、周波数温度特性の改善されたSAW共振子が得られる。

次に、本例の水晶片を用いたSAW共振子の設計条件を定めるべく、上記と同様の方法でまずIDTの交差指電極一本当たりの弾性表面波の反射係数 a を求める。図21に、本例の切断方位を持つ水晶片の X' 軸方向に伝搬する弾性表面波の位相速度の計算結果を速度比 D を用いて示してある。この図には、本例の切断方位のうち、カット角の組み合わせとして角度 θ が 6.5 および角度 ϕ が 32.5 度の速度比 D と、水晶STカットの速度比を合わせて示してある。なお、角度 θ および ϕ が 6.5 度および 32.5 度の電極膜厚 H が 0 の場合の位相速度 V_0 は、 3308.2m/s であった。

本例においても電極膜厚 H と波長 λ の比 H/λ が 0.03 の時の位相速度の変化率 $D = 0.9798$ を用い、(5) 式から

(9)

17

本例の水晶片を用いた場合の反射係数を計算し、反射係数 a として 0.2871 が得られる。さらに、水晶STカットSAW 共振子と同じ程度のエネルギー閉じ込めが得られる程度のトータル反射係数 ($\Gamma = 2.448$) として交差指電極の対数 M を計算すると対数 M は 71 となる。これにより、本例の水晶片を用いて交差指電極の対数 M が 71 以上との IDT を設ければ、高い Q 値を持ち、周波数温度特性が優れ、さらに、短期安定性にも優れた SAW 共振子を実現できることがわかる。また、SAW 共振子の並列容量値 C_0 は上記と同様に $6pF$ 以下であるので、対数 M の最大値は 300 対程度となる。

これによって、本例の水晶片を用いた SAW 共振子の設計条件を見いだせたので、図 2 あるいは図 3 に基づき説明したパワーフロー角を考慮して IDT および反射器を配置することにより高い Q 値を持った SAW 共振子を提供することが可能となる。本例の切断方位を用いた場合のパワーフロー角の影響を図 22 に示した。図 22 は、従来の SAW 共振子のようにパワーフロー角を考慮しないで IDT および反射器を配置した場合に、その電極の配置の方向とパワーフロー角 PFA とのずれが大きくなると Q 値の大幅な低下が測定されることを示している。

図 23 に、角度 θ を 6.5 度とし、角度 ϕ を 30 度から 35 度の範囲で変化させた場合のパワーフロー角 PFA を示している。角度 θ および ϕ が 6.5 度および 32.5 度のときのパワーフロー角 PFA は 3.1 度となる。また、これとは別に、角度 θ および ϕ が 5.4 度および 32.1 度のときのパワーフロー角 PFA は 3.2 度である。図 22 に示したように、それぞれの電極の伸びた方向に直交する方向、すなわち、位相の伝搬する方向 ϕ に対し電極の並んだ方向を角度 δ だけずらした場合、このずれ角 δ とパワーフロー角 PFA との差が $\pm 1^\circ$ 程度以上であれば、ずれ角 δ がパワーフロー角 PFA と合致した場合と同じ程度の非常に高い Q 値が得られる。さらに、ずれ角 δ とパワーフロー角 PFA との差が $\pm 3^\circ$ 程度以内であれば、 Q 値は半分程度に減少するが、従来の数倍の高い Q 値が得られる。このような角度

範囲でなくとも、図から判るように、パワーフロー角 PFA の方向に多少でもずれ角 δ を設定することによって Q 値は改善される。

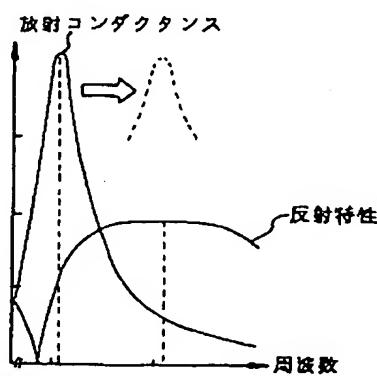
本例に示した角度 θ および ϕ の組み合わせの切断方位を持った水晶片にパワーフロー角を考慮して IDT および反射器を配置した SAW 共振子によって、例えば Q 値が共振周波数 152MHzにおいて 20000 であり、等価直列抵抗が 15Ω 、等価直列容量が $3.2pF$ 、容量比が 1700 程度といった共振子の等価定数を備えた SAW 共振子を作成できる。これららの数値は従来の ST カット SAW 共振子と同等以上であり、周波数温度特性は上述したように ST カット SAW 共振子より優れた特性を示す。さらに、本例の SAW 共振子は周波数短期安定度にも優れており、サンプル周期 τ が 2 秒のときのアラン分散の値が約 3×10^{-9} と ST カット SAW 共振子 (約 1.3×10^{-8}) より 1 衍程度優れた安定性を示す。

なお、以上の例では、1 ポートタイプの SAW 共振子に基づき説明しているが、2 ポートタイプであってももちろん良い。また、パワーフロー角を考慮した IDT および反射器の配置は、水晶を圧電体として採用した SAW 共振子に限らず、 LiTaO_3 、 LiNbO_3 等の他の圧電体素材を採用した SAW 共振子についても適用できることはもちろんである。また、本発明は、SAW 共振子に限らず、SAW フィルターやその他の SAW デバイスにも適用でき、共振先鋒度が高く、優れた温度特性を有する SAW デバイスを提供できる。さらに、本発明にかかる SAW 共振子を収納する保持器については、円筒形の容器あるいは平型の金属容器であっても良く、また、セラミックの面実装タイプの容器であってももちろん良い。

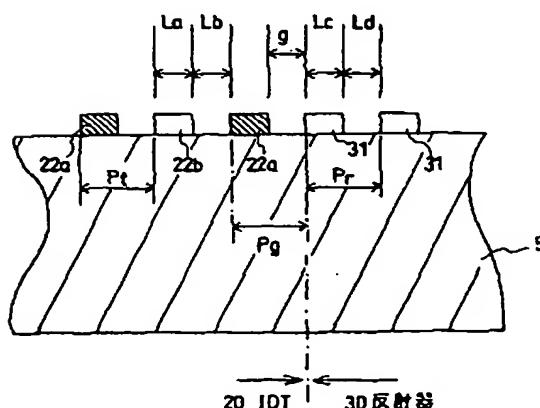
30 産業上の利用可能性

本発明にかかる SAW デバイスは、高い Q 値を持ち、優れた温度特性や、周波数特性を備えているので、移動体通信などに用いられる高周波数領域において高い精度の要求される発振装置に好適なデバイスである。

【第 6 図】

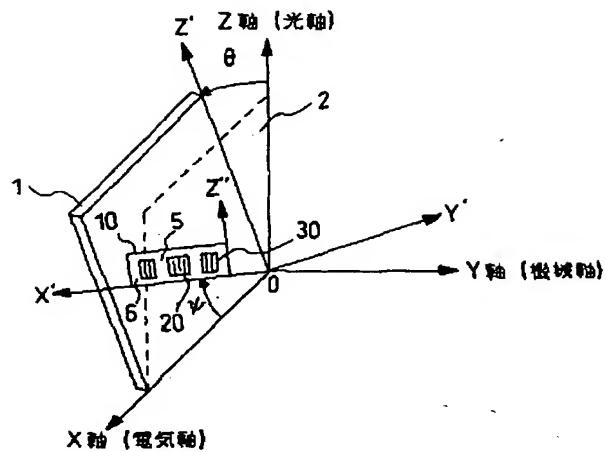


【第 7 図】

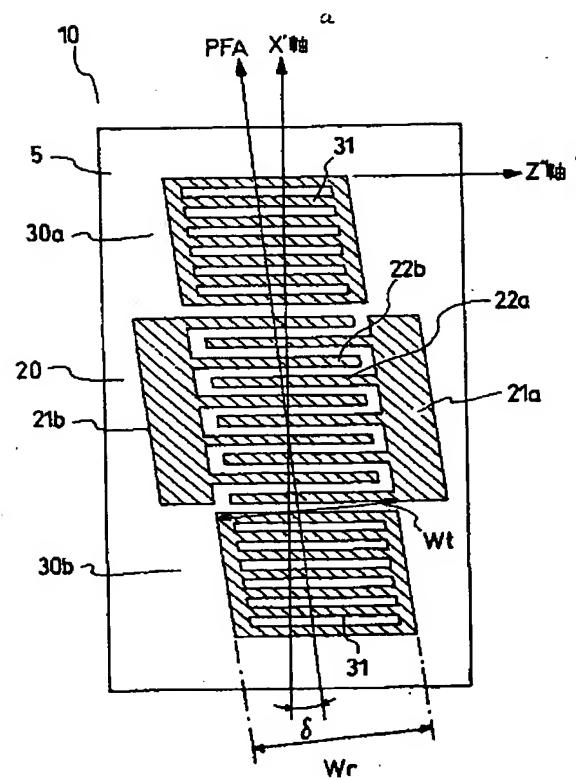


(10)

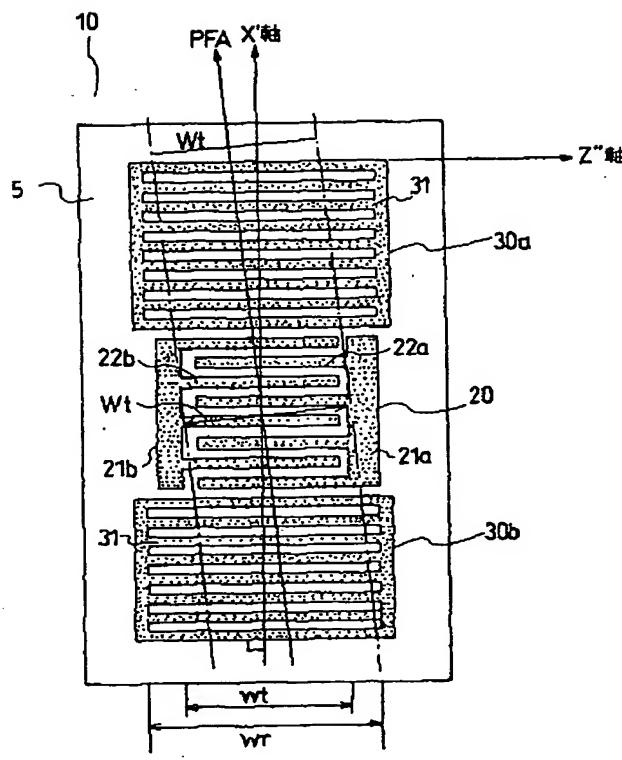
【第1図】



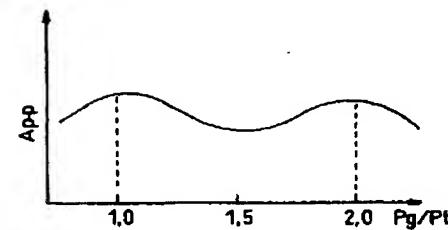
【第2図】



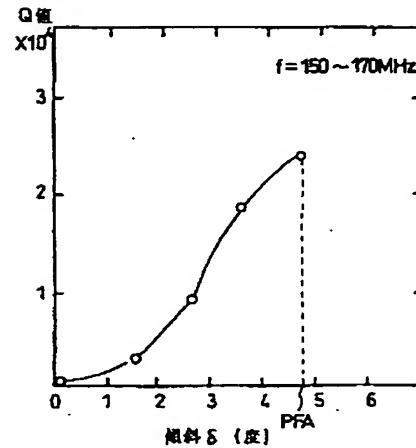
【第3図】



【第8図】

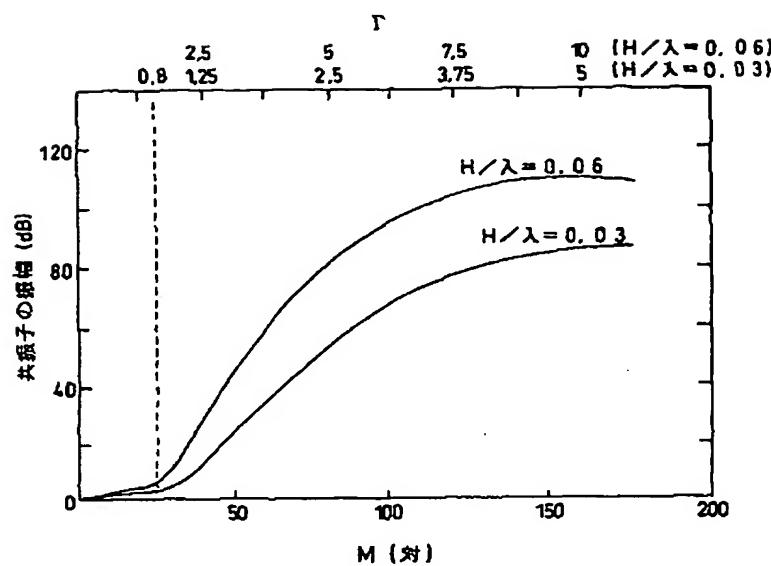


【第9図】

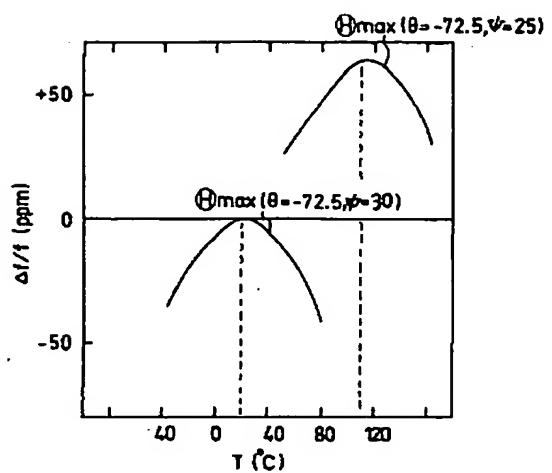


(11)

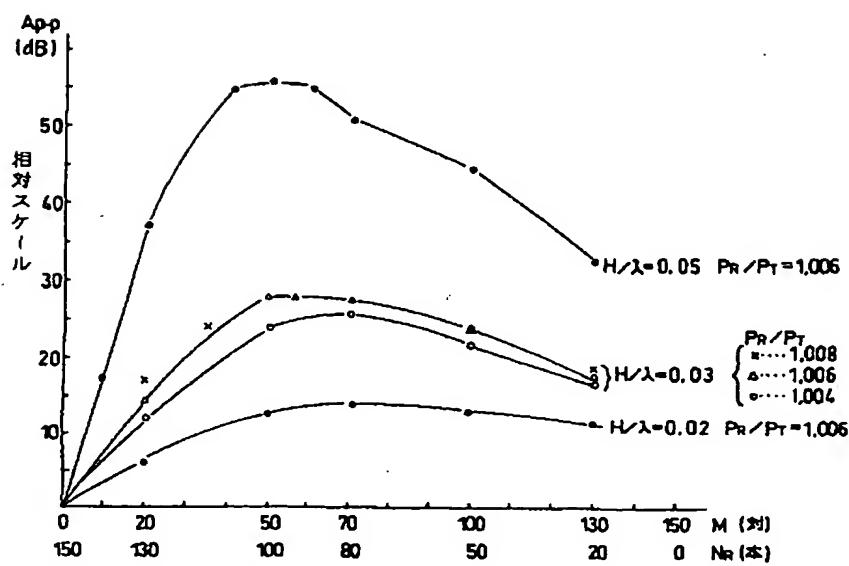
【第4図】



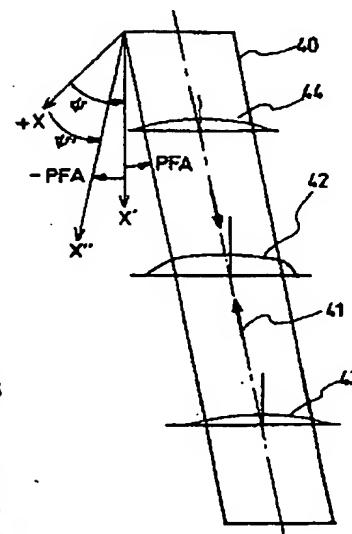
【第10図】



【第5図】

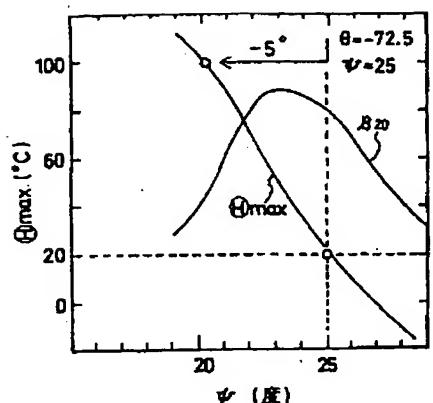


【第12図】

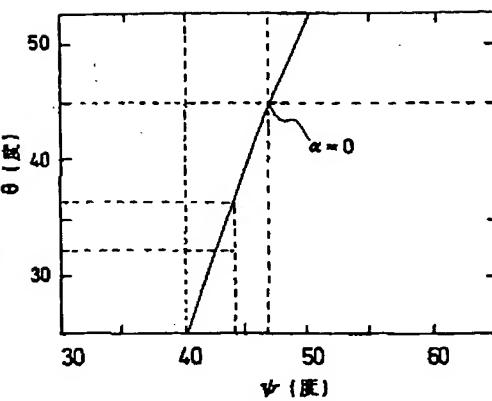


(12)

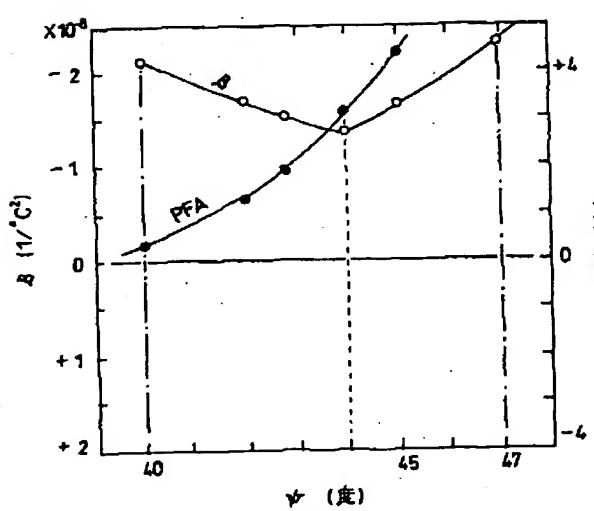
【第11図】



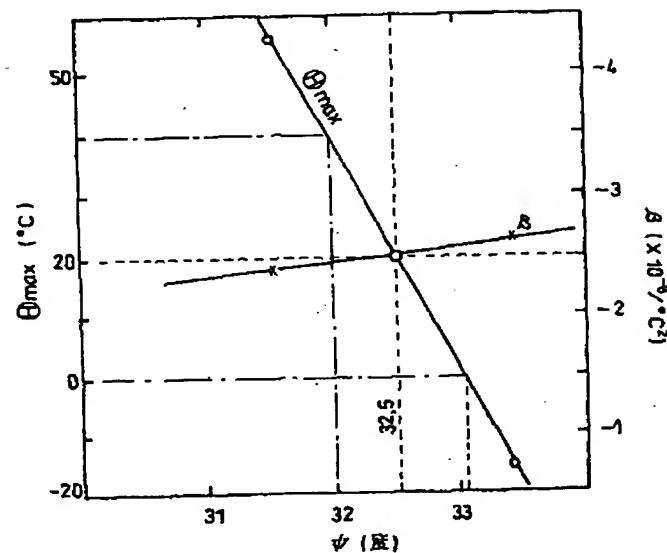
【第13図】



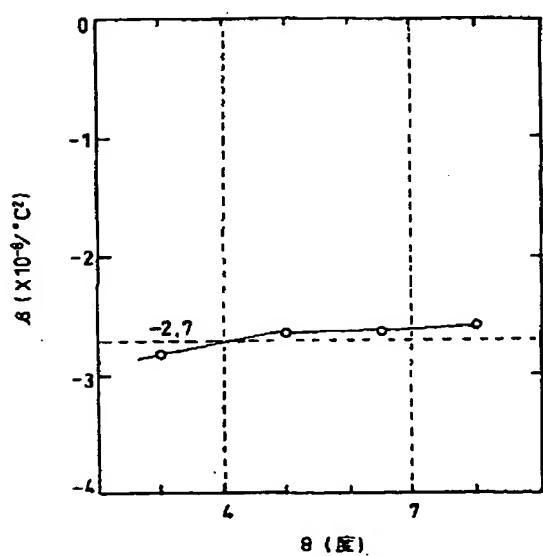
【第14図】



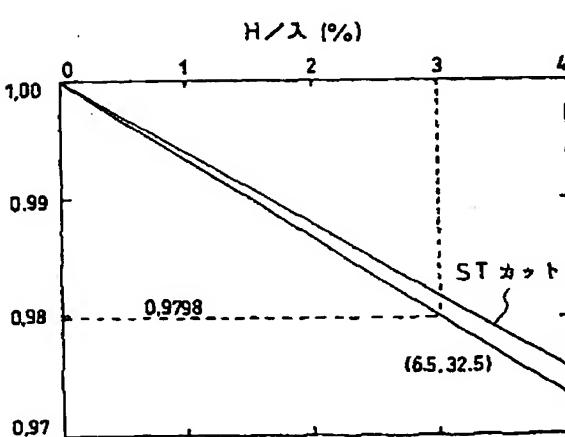
【第18図】



【第19図】

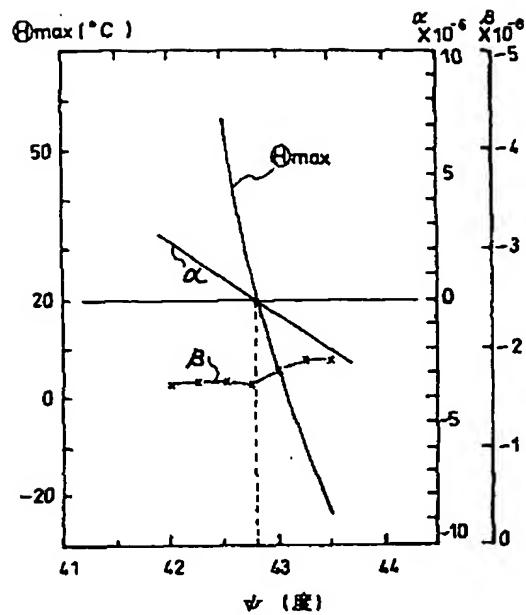


【第21図】

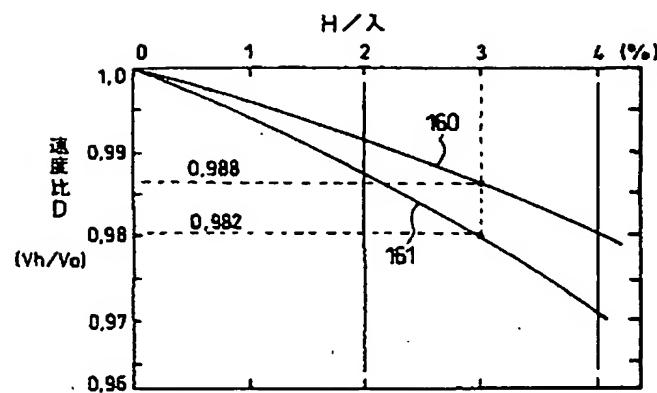


(13)

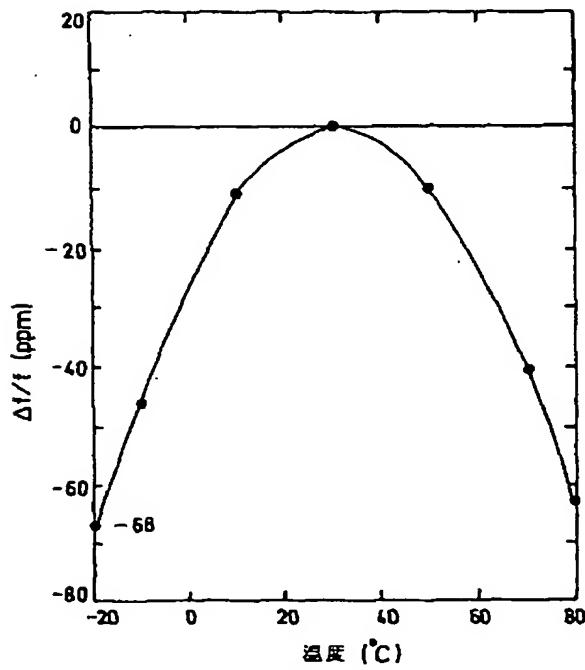
【第15図】



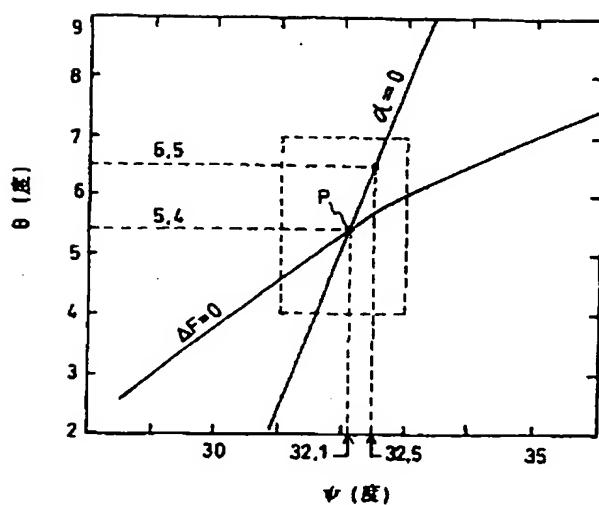
【第16図】



【第20図】

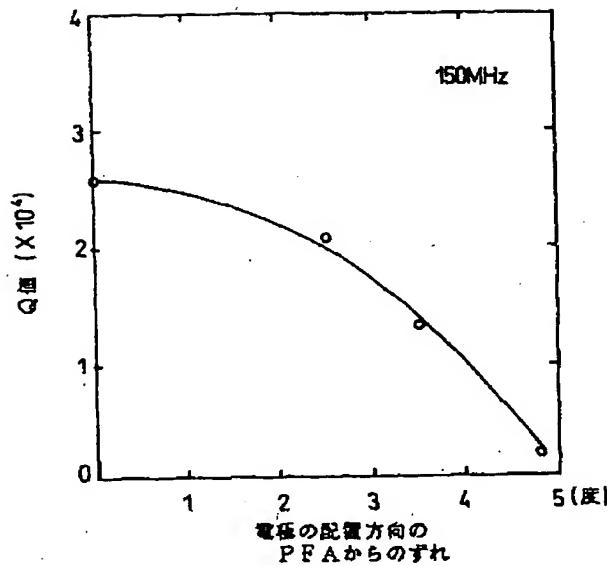


【第17図】

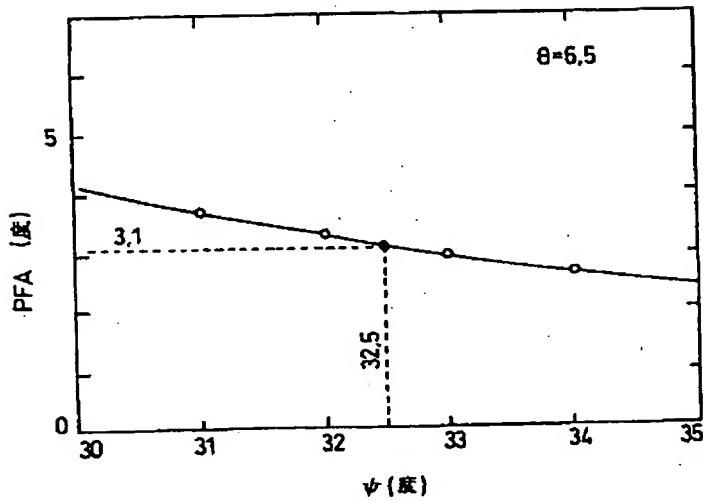


(14)

【第22図】



【第23図】



フロントページの続き

(56)参考文献

特開 昭57-73513 (J P, A)

特開 昭57-5418 (J P, A)

米国特許4705979 (U S, A)

(58)調査した分野(Int. Cl. 7, DB名)

H03H 9/25

H03H 9/145